

УДК 621.372

А.Г. Лоцилов, Т.Т. Чинь, Н.Д. Малютин, Г.А. Малютин

Расчетно-экспериментальный метод измерения частотной зависимости фазовых скоростей синфазных и противофазных волн в связанных линиях с неуравновешенной электромагнитной связью

Описан расчетно-экспериментальный метод измерения частотной зависимости фазовых скоростей синфазных и противофазных волн в связанных полосковых линиях передачи. Метод основан на экспериментальном определении резонансных частот секции, в которой первая полоска является токонесущей, включается между входом и выходом, а вторая полоска, связанная с токонесущей полоской, находится под плавающим потенциалом. При неоднородном диэлектрическом заполнении в секции наблюдаются периодически повторяющиеся резонансы. Параллельно с экспериментальными измерениями производится расчет частотных характеристик по приближенно определенным первичным параметрам. На каждой из резонансных частот значение расчетной резонансной частоты сводится к значению экспериментально определенной частоты путем вариации первичных параметров. Затем по найденным первичным параметрам определяются частотные зависимости фазовых скоростей синфазных и противофазных волн в комплексной форме. Метод был успешно применен для связанных полосковых линий в диапазоне частот до 8 ГГц.

Ключевые слова: связанные полосковые линии, полоска под плавающим потенциалом, резонансные частоты, вариация первичных параметров, эффективные диэлектрические проницаемости, фазовые скорости синфазных и противофазных волн.

DOI: 10.21293/1818-0442-2022-25-4-19-27

Полосковые линии находят широкое применение в современной радиоэлектронной аппаратуре радиолокации, связи, измерений, т.к. позволяют уменьшить массу и габариты узлов и улучшить их технологичность. Связанные полосковые линии (СПЛ) позволяют проектировать широкий спектр устройств СВЧ, поэтому их исследование актуально и в настоящее время [1–8]. Знание первичных и вторичных параметров связанных линий передачи необходимо для более точного моделирования устройств защиты от коротких импульсов (модальных фильтров) [9, 10], интегральных схем [11], высокоскоростных цифровых систем [12], а также для измерения диэлектрической проницаемости диэлектриков [13].

Одна из важных задач при характеристике связанных линий передачи заключается в определении расчетным и экспериментальным путем частотной зависимости фазовых скоростей синфазной v_c и противофазной v_{π} квази-Г-волн.

В [14] описан метод измерения, посредством которого можно точно определять параметры связанных микрополосковых линий путем раздельного возбуждения одного или другого режима возбуждения. Параметры, определенные на основе этих измерений, коррелируют с данными о характеристиках направленных ответвителей. Однако в них используется относительно сложная схема, требующая четырех подключений к микрополосковому образцу. Кроме этого, не учитывается изменение скорости распространения мод с частотой.

Известен способ измерения фазовых скоростей синфазных и противофазных волн в связанных полосковых линиях (СПЛ) путем измерения резонанс-

ных частот связанных отрезков [15]. Для определения частотной зависимости фазовых скоростей синфазных и противофазных волн необходимо измерять образцы разной длины, так как определяется «фундаментальный» полуволновый резонанс. Применение разных образцов вносит дополнительные погрешности в измерения. Недостатком данного способа является также необходимость определять резонансные частоты в двух разных режимах возбуждения, что связано с переключением коаксиально-полосковых переходов и соединительных коаксиальных кабелей.

Способ, основанный на измерении резонансных частот кольцевого резонатора из двух связанных линий, описан в статьях [16, 17]. Недостатком данного способа заключается в том, что в кольце связанные линии имеют разную физическую длину и, следовательно, разную электрическую длину. В результате могут наблюдаться два близко расположенных резонанса, что свидетельствует о невозможности обеспечения «чистых» режимов возбуждения синфазных и противофазных волн. Как следствие, приходится вводить поправочные коэффициенты при определении электрических длин, а в конечном итоге – фазовых скоростей синфазной и противофазной волн. Эти поправочные коэффициенты пропорциональны отношению близких резонансных частот.

Способ измерения в результате расчета и экспериментального измерения коэффициента отражения от образца, содержащего соединительные линии и С-секцию на основе связанных линий, описан в [18]. Недостатки данного способа связаны с особенностями частотных характеристик С-секции при неоднородном диэлектрическом заполнении в попереч-

ном сечении связанных линий. На частоте, соответствующей сдвигу фазы 90° в каждой из связанных линий, возникает резонанс вследствие интерференции волн, распространяющихся с разными фазовыми скоростями. Поэтому авторы способа ограничивают длину связанных линий так, чтобы не достигать частоты резонанса, на которой невозможно применить алгоритм расчета зависимости коэффициентов распространения от частоты. С целью получения коэффициентов распространения в более широком диапазоне частот в упомянутой выше работе применяется несколько образцов с разной длиной связанных линий, что фактически изменяет условия проведения эксперимента. Это является основным недостатком способа определения коэффициентов распространения синфазной (четной) и противофазной (нечетной) волн.

В настоящей работе представлены результаты разработки и реализации расчетно-экспериментального метода измерения частотной зависимости фазовых скоростей синфазных и противофазных волн в связанных полосковых линиях передачи. В основе метода лежит экспериментальное определение резонансных частот секции связанных полосковых линий с неоднородным диэлектрическим заполнением.

Эквивалентная схема секции и конструкция связанных линий

На рис. 1 показана эквивалентная схема секции связанных полосковых линий, моделируемая и экспериментально исследуемая в процессе реализации описываемого расчетно-экспериментального метода измерения фазовых скоростей синфазных и противофазных волн в СПЛ. Секция состоит из двух параллельных полосок I и II длиной $l = 0,048$ м и двух соединительных полосок длиной $l^* = 0,011$ м. В секции полоска I является токонесящей, она включается через соединительную полоску с входом (порт 1). Противоположный конец полоски I через другую соединительную полоску соединен с выходом секции (порт 3).

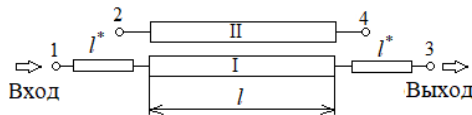


Рис. 1. Эквивалентная схема секции связанных полосковых линий

Полоска II, связанная с токонесящей полоской I, находится под плавающим потенциалом с граничными условиями холостого хода на обоих концах (порты 2 и 4).

Впервые наличие резонанса в секции представленных типов было показано в работах [19, 20]. В предложенном методе проводится определение резонансных частот в широком диапазоне частот, количество резонансов может достигать 5–10 в зависимости от конструктивного исполнения связанных линий и параметров используемых подложек. Возможность наблюдать ограниченное множество резонансов позволяет в одной позиции подключения

испытуемого образца (секции связанных линий) получать необходимые данные для определения частотной зависимости фазовых скоростей волн синфазного и противофазного типов. В таких секциях возникают резонансы вследствие интерференции распространяющихся мод с разными фазовыми скоростями. Теоретические особенности интерференции синфазных и противофазных мод в подобных конструкциях связанных полосковых линий были рассмотрены в [21–25].

На рис. 2 показано поперечное сечение секции связанных полосковых линий, взятой для апробации метода. Параметры полосок структуры: ширина горизонтальных полосок $w_1 = 0,7$ мм; размер вертикальных полосок $w_2 = 2$ мм; толщина горизонтальной подложки $h_1 = 1,6$ мм; толщина вертикальной подложки $h_2 = 0,635$ мм; ширина горизонтальной подложки $a = 24$ мм; относительные диэлектрические проницаемости $\epsilon_{r1} = 4,5$, $\epsilon_{r2} = 6,15$; толщина проводников $0,035$ мм.

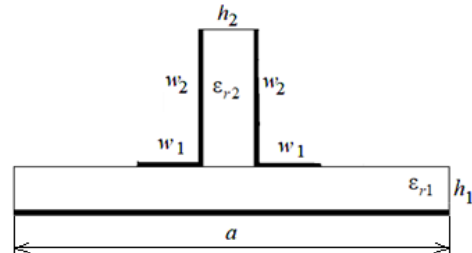


Рис. 2. Поперечное сечение связанных полосковых линий

На рис. 3 показан изготовленный макет СПЛ.

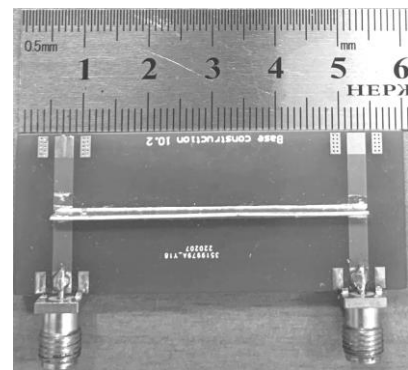


Рис. 3. Изготовленный макет СПЛ

В макете горизонтальная подложка сделана из фольгированного материала FR-4 размером 60×24 мм с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_{r1} = 4,5$, $\text{tg}\delta_1 = 0,02$, а вертикальная – из материала RO-4360 G2 с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_{r1} = 6,15$, $\text{tg}\delta_2 = 0,0038$.

На рис. 4 показаны экспериментальная и расчетная частотные зависимости коэффициента передачи секции в виде модуля коэффициента матрицы рассеяния $|S_{31}(f)|$. Пунктиром изображена измеренная частотная зависимость коэффициента пере-

дачи секции в виде модуля коэффициента матрицы рассеяния $|S_{31}(f)|_{\text{эксп}}$. Сплошной линией показана рассчитанная частотная зависимость $|S_{31}(f)|_{\text{расч}}$.

На графиках размечены экспериментально полученные резонансные частоты $f_{i \text{эксп}}$ ($i=1, \dots, 5$) и расчетные резонансные частоты $f_{i \text{расч}}$ ($i=1, \dots, 5$).

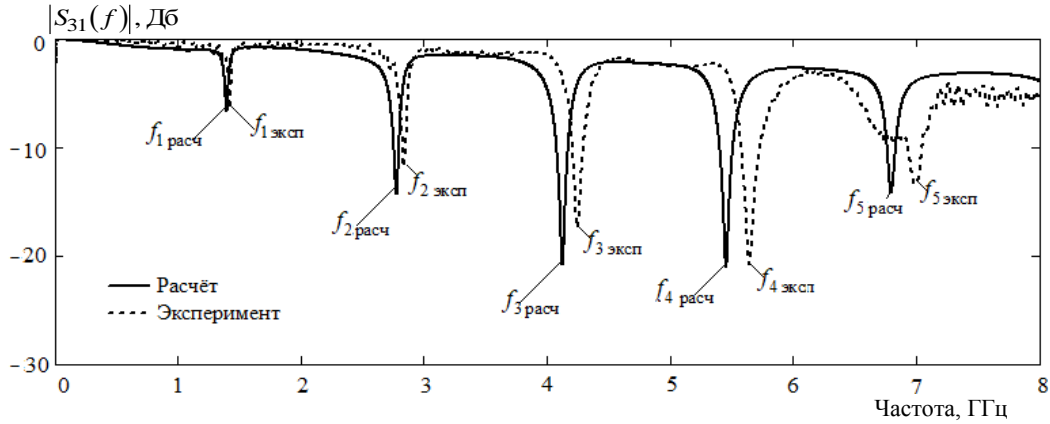


Рис. 4. Экспериментальные и расчетные частотные зависимости коэффициента передачи секции в виде модуля коэффициента матрицы рассеяния $|S_{31}(f)|$

Детализация метода.

Результат измерения фазовых скоростей

Метод измерения частотной зависимости фазовых скоростей синфазных и противофазных волн в связанных линиях с неуравновешенной электромагнитной связью состоит в следующей последовательности действий. Производят изготовление тестируемой секции связанных линий (см. рис. 1, рис. 2). На векторном анализаторе цепей измеряется коэффициент передачи в виде модуля коэффициента матрицы рассеяния $|S_{31}(f)|_{\text{эксп}}$ в широком диапазоне частот, определяются экспериментальные значения резонансных частот $f_{i \text{эксп}}$ из условия минимума $\min |S_{31}(f_i)|_{\text{эксп}}$. Пример измерений $|S_{31}(f)|_{\text{эксп}}$ показан на рис. 4 (пунктирная кривая). Индекс $i=1, 2, \dots, 5$ – номер резонанса, начиная с самого низкочастотного и заканчивая высокочастотным в частотном диапазоне измерений до 8 ГГц. Затем рассчитывается частотная зависимость коэффициента передачи $|S_{31}(f)|$ по приближенно определенным первичным параметрам в виде матриц коэффициентов электростатической индукции **C**, индуктивностей **L**, сопротивлений **R** и проводимостей **G** [26, 27]. На этом первом шаге расчет частотной зависимости $|S_{31}(f)|$ был проведен при следующих значениях матриц **C** и **L**:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_{11} & -C_{12} \\ -C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 316,7 & -273,6 \\ -273,6 & 316,7 \end{bmatrix} \cdot 10^{-12}, \text{ Ф/м,}$$

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{12} & L_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,4093 & 0,3096 \\ 0,3096 & 0,4093 \end{bmatrix} \cdot 10^{-6}, \text{ Гн/м.}$$

При этом на первом и последующих шагах учитывались потери в связанных линиях. Частотная зависимость матрицы **L** определялась так же, как в [28, 29]:

$$\mathbf{L} = \mathbf{L} + \frac{\mathbf{R}}{2\pi f}, \text{ Гн/м,}$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} (w_1 \cdot \delta \cdot 10^{-3})^{-1} & 0 \\ 0 & (w_1 \cdot \delta \cdot 10^{-3})^{-1} \end{bmatrix}, \text{ Ом/м.}$$

Матрица **G** рассчитывалась из условия того, что G_{12} зависит от потерь в диэлектрике вертикальной подложки, что обусловлено картиной электрического поля [24, 27]:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \text{tg}\delta_1 \cdot (C_{11} - C_{12}) \cdot f & \text{tg}\delta_2 \cdot C_{12} \cdot f \\ \text{tg}\delta_2 \cdot C_{12} \cdot f & \text{tg}\delta_1 \cdot (C_{11} - C_{12}) \cdot f \end{bmatrix} \cdot 2\pi, \text{ См/м,}$$

где $\delta = \frac{2,074}{\sqrt{f \cdot 10^{-9}}}$, мкм – толщина скин-слоя [29],

$\text{tg}\delta_1 = 0,02$ – для подложки FR-4, $\text{tg}\delta_2 = 0,0038$ – для подложки RO4360G2.

На следующих шагах решалась задача уточнения погонных параметров и приближения расчетных значений резонансных частот $f_{i \text{расч}}$ к $f_{i \text{эксп}}$ путем вариации элементов **C** и **L**.

Расчетные значения резонансных частот $f_{i \text{расч}}$ определяются исходя из условия $\min |S_{31}(f_i)|_{\text{расч}}$. Далее производится сравнение экспериментальных частот резонанса $f_{i \text{эксп}}$ и вычисленных $f_{i \text{расч}}$, выполняется вариация первичных параметров в виде матриц коэффициентов электростатической индукции **C** и матриц погонных индуктивностей **L**, используемых при расчете частотных характеристик секции связанных линий с целью изменения $f_{i \text{расч}}$ до совпадения $f_{i \text{расч}}$ с $f_{i \text{эксп}}$ по критерию

$$\min (|f_{i \text{эксп}} - f_{i \text{расч}}| \cdot f_{i \text{эксп}}^{-1}) \leq \delta, \quad (1)$$

где δ – погрешность несовпадения резонансных частот, полученных в результате вариации матриц **C** и **L**. Варьирование элементов матриц проводи-

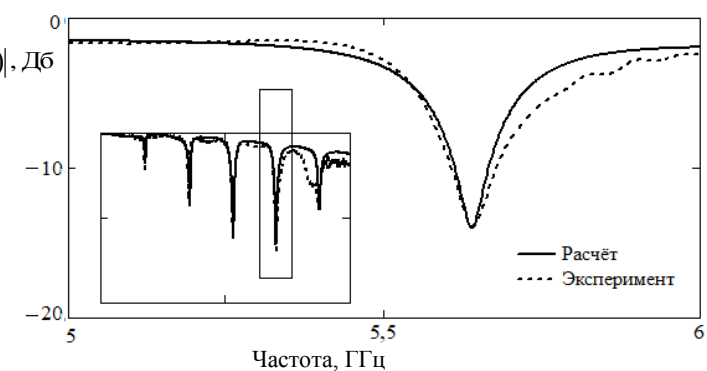
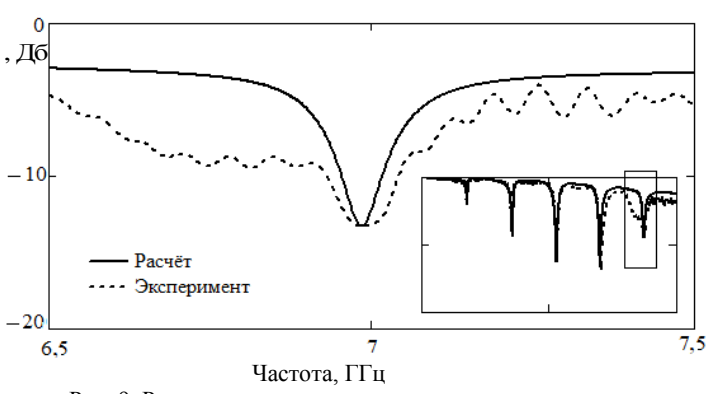
лось случайным образом. При этом определялось условие (1) не только по совпадению частот $f_{i \text{ эксп}}$ и $f_{i \text{ расч}}$, но и по глубине резонанса. На каждой из частот $f_{i \text{ эксп}}$ получены значения матрицы $\mathbf{C}_i \text{ корр}$ и $\mathbf{L}_i \text{ корр}$. На рис. 5 в таблице показаны результаты вариации матриц $\mathbf{C}_1 \text{ корр}$ и $\mathbf{L}_1 \text{ корр}$ до выполнения условия (1) на первой резонансной частоте. При указанных $\mathbf{C}_1 \text{ корр}$ и $\mathbf{L}_1 \text{ корр}$ получено $\delta = 0,12\%$. В выделенном квадрате на рис. 5 показаны частотные зависимости $|S_{31}(f)|_{\text{эксп}}$ и $|S_{31}(f)|_{\text{расч}}$ во всем частотном диапазоне для проверки условия устойчивости $\max(|f_{i \text{ эксп}} - f_{i \text{ расч}}|) \leq \Delta$, где Δ – наибольшее отклонение расчетных значений от эксперименталь-

ных, фиксируемое на первом шаге. Графически это иллюстрируется отсутствием расхождения $f_{i+1 \text{ расч}}$ с $f_{i+1 \text{ эксп}}$ в результате изменения $C_i \text{ корр}$, $L_i \text{ корр}$ на предыдущем шаге i реализации процедуры случайного поиска. Вычисления делались нами при переходе от частоты $f_{1 \text{ эксп}}$ к каждой следующей частоте с проверкой условия (1) и условия устойчивости решения $\max(|f_{i \text{ эксп}} - f_{i \text{ расч}}|) \leq \Delta$. С каждым последующим шагом происходило уменьшение Δ , что можно объяснить пошаговым приближением частотной зависимости расчетных параметров связанных линий к их измеряемым значениям. Полученные результаты иллюстрируется на рис. 5–9 из таблицы.

Результаты вариации корректирующих матриц для достижения совпадения резонансов секции СПЛ

	Графики	$\mathbf{C}_i \text{ корр}$, пФ/м; $\mathbf{L}_i \text{ корр}$, мкГн/м
1	<p>Рис. 5. Результат вариации для первого резонанса</p>	$\mathbf{C}_1 \text{ корр} = \begin{bmatrix} 317,9 & -274,4 \\ -274,4 & 317,9 \end{bmatrix},$ $\mathbf{L}_1 \text{ корр} = \begin{bmatrix} 0,401 & 0,305 \\ 0,305 & 0,401 \end{bmatrix}$
2	<p>Рис. 6. Результат вариации для второго резонанса</p>	$\mathbf{C}_2 \text{ корр} = \begin{bmatrix} 312,4 & -274,6 \\ -274,6 & 312,4 \end{bmatrix},$ $\mathbf{L}_2 \text{ корр} = \begin{bmatrix} 0,3995 & 0,3050 \\ 0,3050 & 0,4020 \end{bmatrix}$
3	<p>Рис. 7. Результат вариации для третьего резонанса</p>	$\mathbf{C}_3 \text{ корр} = \begin{bmatrix} 318,3 & -271,4 \\ -271,4 & 318,3 \end{bmatrix},$ $\mathbf{L}_3 \text{ корр} = \begin{bmatrix} 0,3998 & 0,305 \\ 0,305 & 0,3998 \end{bmatrix}$

Продолжение таблицы

	Графики	$C_{i \text{ корр}}$, пФ/м; $L_{i \text{ корр}}$, мкГн/м
4	 <p>Рис. 8. Результат вариации для четвертого резонанса</p>	$C_{4 \text{ корр}} = \begin{bmatrix} 319,8 & -271,4 \\ -271,4 & 319,8 \end{bmatrix},$ $L_{4 \text{ корр}} = \begin{bmatrix} 0,3992 & 0,3050 \\ 0,3050 & 0,3992 \end{bmatrix}$
5	 <p>Рис. 9. Результат вариации для пятого резонанса</p>	$C_{5 \text{ корр}} = \begin{bmatrix} 317,3 & -276,0 \\ -276,0 & 317,3 \end{bmatrix},$ $L_{5 \text{ корр}} = \begin{bmatrix} 0,3988 & 0,3050 \\ 0,3050 & 0,3988 \end{bmatrix}$

В результате получается множество откорректированных значений $C_{i \text{ корр}}$ и $L_{i \text{ корр}}$ и на каждой из частот $f_{i \text{ эксп}}$ удовлетворяется условие $\min(|f_{i \text{ эксп}} - f_{i \text{ расч}}| \cdot f_{i \text{ эксп}}^{-1}) \leq \delta$, а частотные зависимости $|S_{31}(f)|_{\text{расч}}$ и $|S_{31}(f)|_{\text{эксп}}$ удовлетворяют условию устойчивости $\max(|f_{i \text{ эксп}} - f_{i \text{ расч}}|) \leq \Delta$ при любых из $C_{i \text{ корр}}$ и $L_{i \text{ корр}}$ (рис. 10). Далее рассчитываются эффективные диэлектрические прони-

цаемости синфазных и противофазных волн [30] с учетом особенностей, изложенных в [31].

$\epsilon_{i \text{ эфф } c} = c^2 \cdot (L_{i1 \text{ корр}} + L_{i2 \text{ корр}})(C_{i1 \text{ корр}} - C_{i2 \text{ корр}})$,
 $\epsilon_{i \text{ эфф } \pi} = c^2 \cdot (L_{i1 \text{ корр}} - L_{i2 \text{ корр}})(C_{i1 \text{ корр}} + C_{i2 \text{ корр}})$,
 где $L_{i1 \text{ корр}}$, $L_{i2 \text{ корр}}$ – коэффициенты i -й корректированной матрицы индуктивностей $L_{i \text{ корр}}$; $C_{i1 \text{ корр}}$, $C_{i2 \text{ корр}}$ – коэффициенты скорректированных матриц коэффициентов электростатической индукции $C_{i \text{ корр}}$; c – скорость света.

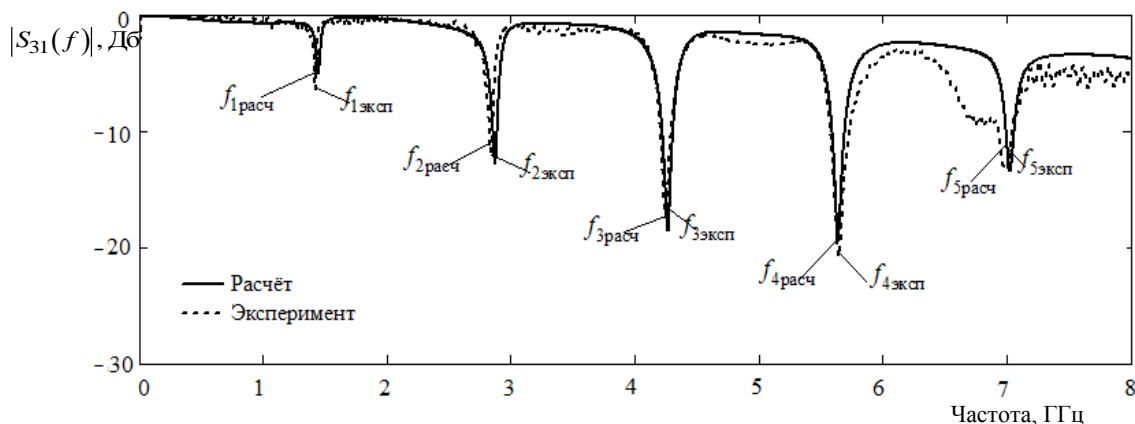


Рис. 10. Экспериментальная и расчетная частотные зависимости коэффициента передачи секции в виде модуля коэффициента матрицы рассеяния $|S_{31}(f)|$

Затем рассчитываются фазовые скорости синфазных и противофазных волн на каждой из частот f_i эксп.

$$v_{ic} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_i \text{эфф} c}}, \quad v_{i\pi} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_i \text{эфф} \pi}}.$$

На рис. 11 показан результат определения частотной зависимости фазовых скоростей синфазной v_{ic} и противофазной $v_{i\pi}$ волн, отношения фазовых скоростей $v_{ic}/v_{i\pi}$ в связанных линиях с неуравновешенной электромагнитной связью.

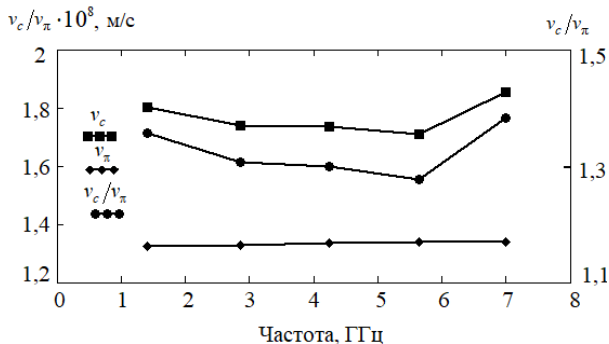


Рис. 11. Частотная зависимость фазовых скоростей синфазной v_{ic} и противофазной $v_{i\pi}$ волн и отношения фазовых скоростей $v_{ic}/v_{i\pi}$

Заключение

Итак, предложен и реализован относительно простой метод для измерения фазовых скоростей синфазных и противофазных волн в связанных линиях с неуравновешенной электромагнитной связью, основанный на экспериментальном определении резонансных частот секции связанных полосковых линий. Приведенный пример реализации метода показывает целесообразность такого пути получения недостающих данных для успешного проектирования устройств. Это справедливо, с одной стороны, по причине резкого сокращения времени для получения необходимой информации при наличии разработанных методик и измерительной аппаратуры; с другой стороны, получение экспериментальных данных так или иначе представляет более надежный способ проверки достижения заданных условий технического задания. Установлено частотное ограничение метода до 6 ГГц, это связано с качеством использованных коаксиально-полосковых переходов, их замена позволит увеличить верхнюю частоту.

Публикация выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках проекта № FEWM-2023-0014 от 16.01.2023.

Литература

1. Особенности характеристик полосно-пропускающих фильтров второго порядка на полуволновых и четвертьволновых микрополосковых резонаторах / Б.А. Беляев, Я.Ф. Бальва, А.А. Лексиков, А.М. Сержантов, С.А. Ходенков, Т.Ю. Шумилов // Изв. вузов. Физика. – 2022. – Т. 65, № 2 (771). – С. 71–81.

2. A Microwave Bandpass Filter on Dielectric Layers with Metal Grids / В.А. Беляев, В.В. Турнев, А.С. Волошин, Р.Г. Галеев // Technical Physics Letters. – 2018. – Р. 408–411.

3. Сычев А.Н. Параметры несимметричных связанных линий с неоднородным диэлектриком / А.Н. Сычев, Н.Ю. Рудый // Доклады ТУСУР. – 2018. – Т. 21, № 4–1. – С. 7–15.

4. A Novel trans-directional coupler based on vertically installed planar circuit / А.Н. Сычев, S.M. Struchkov, V.N. Putilov, N.Y. Ruyi // Proc. of the 45-th Eur. Microw. Conf. – 2015. – Р. 283–286.

5. Modeling of the vertically installed planar coupled lines by the numerical conformal transformation technique / А.Н. Сычев, S.M. Struchkov, N.Y. Rudyi, A.S. Salnikov // IEEE MTT-S Int. Conf. on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization (NEMO). – 2017. – Р. 124–126.

6. Дроботун Н.Б. Модуль сверхширокополосного усилителя диапазона 10 МГц – 20 ГГц с диссипативной коррекцией АЧХ // Доклады ТУСУР. – 2016. – Т. 19, № 4. – С. 74–77.

7. Electrical characteristics of a modal filter with a passive conductor in the reference plane cutout / M.A. Samoylichenko, Y.S. Zhechev, V.P. Kosteletskii, T.R. Gazizov // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2021. – Vol. 63, No. 2. – Р. 435–442.

8. Экспериментальное подтверждение возможности защиты радиоэлектронной аппаратуры от сверхкороткого импульса за счет его разложения в С-секции с лицевой связью / А.В. Носов, П.С. Суровцев, А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов // Доклады ТУСУР. – 2016. – № 3. – С. 47–50.

9. Газизов А.Т. Измерение и моделирование временного отклика печатных модальных фильтров с лицевой связью / А.Т. Газизов, А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов // Радиотехника и электроника. – 2018. – Т. 63, № 3. – С. 292–298.

10. Черникова Е.Б. Моделирование и разработка макета зеркально-симметричного модального фильтра / Е.Б. Черникова, А.О. Белоусов, А.М. Заболоцкий // Электронные средства и системы управления: матер. докл. междунар. науч.-практ. конф. – 2017. – № 1-2. – С. 5–7.

11. Analysis and modeling of GaAs-based coupled microstrip lines/ X. Lv, W. Yu, J. Wu, X. Luo, Y. Ge // Proc. IEEE Int. Conf. Microw. Technol. Comput. Electromagnet. – 2011. – Р. 136–139.

12. Kim J.H. Accurate characterization of broadband multiconductor transmission lines for high-speed digital systems / J.-H. Kim, D. Oh, W. Kim // IEEE Trans. Adv. Packag. – Vol. 33, No. 4. – Р. 857–867.

13. Microwave sensors for dielectric sample measurement based on coupled-line section / I. Piekarz, J. Sorocki, K. Wincza, S. Gruszczynski // IEEE Trans. Microw. Theory Techn. – 2017. – Vol. 65, No. 5. – Р. 1615–1631.

14. Napoli L.S. Characteristics of coupled microstrip lines / L.S. Napoli, J.J. Hughes // RCA Rev. – 1970. – Vol. 31. – Р. 479–498.

15. Richings J.G. Measured odd- and even-mode dispersion of coupled microstrip lines / J. G. Richings, B. Easter // IEEE Trans. Microw. Theory Techn. – 1975. – Vol. MTT-23, No. 10. – Р. 826–828.

16. Gould J.W. Even and odd mode guide wavelengths of coupled lines in microstrip / J.W. Gould, E.C. Tolboys // Electron. Letts. – 1972. – Vol. 8, No. 5. – Р. 121–122.

17. Wolff I. Microstrip ring resonator and dispersion measurement on microstrip lines / I. Wolff, N. Kpi // Electron. Letts. – 1971. – Vol. 7. – Р. 779.

18. Broadband Determination of the Even- and Odd-Mode Propagation Constants of Coupled Lines Based on Two-

Port Measurements / A. Hernández-Escobar, E. Abdo-Sánchez, J. Esteban, T.M. Martín-Guerrero, C. Camacho-Peñalosa // IEEE Trans. Microw. Theory Techn. – 2020. – Vol. 68, Iss. 2. – P. 648–654.

19. Zysman G.I. Coupled Transmission Line Networks in an Inhomogeneous Dielectric Medium / G.I. Zysman, A.K. Johnson // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1969. – Vol. 17, No. 10. – P. 753–759.

20. Vorobev P.A. Analysis of the Characteristics of Coupled Strip Lines Using a nonuniform Dielectric with Concentrated Controlled Discontinuities / P.A. Vorob'ev, N.D. Malyutin // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenij. Radioelektronika. – 1975. – Vol. 18, Iss. 2. – P. 97–99.

21. Special aspects in interference of in-phase and antiphase waves with unequal phase velocities in coupled lines under pulse impact / A.N. Sychev, N.D. Malyutin, E.I. Trenkal, G.A. Malyutin // Journal of Physics. – 2020. – P. 22023.

22. A Miniaturize. High Efficient Quadband Rectenna Design for RF Energy Harvesting / S. Ullah, C. Ruan, T.Ul. Haq, A.K. Fahad // Proceedings of the 2018 IEEE 7th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation. – 2018. – No. 8538151. – P. 202–203.

23. Design of a compact wideband butler matrix using vertically installed planar structure / Q.P. Chen, Z. Qamar, S.Y. Zheng, Y. Long // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. – 2018. – No. 8408811. – P. 1420–1430.

24. Modeling of the vertically installed planar coupled lines by the numerical conformal transformation technique / A.N. Sychev, S.M. Struchkov, N.Y. Rudyi, A.S. Salnikov // IEEE MTT-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization for RF, Microwave, and Terahertz Applications. – 2017. – No. 7964202. – P. 106–108.

25. A Wideband Tunable Reflection-Type Phase Shifter with Wide Relative Phase Shift / W.J. Liu, S.Y. Zheng, Y.M. Pan, Y.X. Li, Y.L. Long // IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs. – 2017. – No. 7812672. – P. 1442–1446.

26. Fusco V. Microwave circuits. Analysis and computer-aided design // Radio and Communications. – 1990. – 286 p.

27. Малютин Г.А. Оптимизация алгоритма расчета полосковых структур методом сеток // Электронные средства и системы управления: матер. докл. Междунар. науч.-практ. конф. – 2021. – № 1–1. – С. 100–103.

28. Djordjevic A.R. Wideband Frequency-Domain Characterization of FR-4 and Time-Domain Causality / A.R. Djordjevic, M.B. Radivoje, D.L. Vladana, T.K. Sarkar // IEEE Trans. on Electromagn. Compatible. – 2001. – Vol. 43, No. 4. – P. 662–667.

29. Анпилогов В.Р. Диссипативные потери в микрополосковых линиях и микрополосковых антеннах / В.Р. Анпилогов, И.В. Зимин, Ю.Н. Чекушкин // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2018. – Т. 5, № 3. – С. 60–69.

30. Сычев А.Н. Системы параметров одинаковых связанных линий с неуравновешенной электромагнитной связью / А.Н. Сычев, С.М. Стручков // Доклады ТУСУР. – 2014. – № 1(31). – С. 39–50.

31. Чинь Т.Т. К определению матричных параметров связанных линий с неуравновешенной электромагнитной связью // Сборник избр. статей научной сессии ТУСУР. – 2021. – № 1-1. – С. 175–179.

Лоцилов Антон Геннадьевич

Канд. техн. наук, доцент, зав. каф. конструирования узлов и деталей радиоэлектронной аппаратуры (КУДР) Томского университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0003-0669-5694
Тел.: +7 (382-2) 51-43-02
Эл. почта: lag@main.tusur.ru

Чинь То Тхань

Аспирант каф. КУДР ТУСУР
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-923-445-04-86
Эл. почта: thanhvodoi1995@gmail.com

Малютин Николай Дмитриевич

Д-р техн. наук, профессор каф. КУДР ТУСУР
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0003-0317-9096
Тел.: +7-391-312-34-56
Эл. почта: ndm@main.tusur.ru

Малютин Георгий Александрович

Студент каф. КУДР ТУСУР
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-953-911-86-10
Эл. почта: mg.mageorge@yandex.ru

Loschilov A.G., Trinh T.T., Malyutin N.D., Malyutin G.A.
Computational and experimental method for measuring the frequency dependence of phase velocities of in-phase and antiphase waves in coupled lines with unbalanced electromagnetic coupling

A computational and experimental method for measuring the frequency dependence of the phase velocities of in-phase and antiphase waves in coupled strip transmission lines is described. The method is based on the experimental determination of the resonant frequencies of a section in which the first strip is current-carrying, is switched on between the input and output, and the second strip connected to the current-carrying strip is under a floating potential. With non-homogeneous dielectric filling, periodically repeated resonances are observed in the section. In parallel with experimental measurements, the frequency characteristics are calculated according to approximately defined primary parameters. At each of the resonant frequencies, the value of the calculated resonant frequency is reduced to the value of an experimentally determined frequency by varying the primary parameters. Then, according to the found primary parameters, the frequency dependences of the phase velocities of in-phase and in-phase waves in a complex form are determined. The method has been successfully applied to connected strip lines in the frequency range up to 8 GHz

Keywords: coupled strip lines, horizontal and vertical position of the strips, phase velocities difference of synphase and antiphase waves, finding the permittivities of the substrates.

DOI: 10.21293/1818-0442-2022-25-4-19-27

References

1. Belyaev B.A., Balva Y.F., Leksikov A.A., Sergeants A.M., Khodenkov S.A., Shumilov T.Yu. [Characteristics of second-order band-pass filters on half-wave and quarter-wave

- microstrip resonators] *Izvestiya Vuzov. Physics*, 2022, vol. 65, no. 2 (771), pp. 71–81 (in Russ.).
2. Belyaev B.A., Tyurnev V.V., Voloshin A.S., Galeev R.G. A Microwave Bandpass Filter on Dielectric Layers with Metal Grids. *Technical Physics Letters*, 2018, pp. 408–411.
 3. Sychev A.N., Rudy N.Yu. [Parameters of asymmetric coupled lines with an inhomogeneous dielectric]. *Proceeding of TUSUR University*, 2018, vol. 21, no. 4–1, pp. 7–15 (in Russ.).
 4. Sychev A.N., Struchkov S.M., Putilov V.N., Ruy N.Y. A Novel trans-directional coupler based on vertically installed planar circuit. *Proceedings of the 45-th European Microwave Conference*, 2015, pp. 283–286.
 5. Sychev A.N., Struchkov S.M., Rudy N.Y., Salnikov A.S. Modeling of the vertically installed planar coupled lines by the numerical conformal transformation technique. *IEEE MTT-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization (NEMO)*, 2017, pp. 124–126.
 6. Drobotun N.B. [Module of a 10 MHz – 20 GHz ultra-wideband amplifier with dissipative frequency response correction]. *Proceeding of TUSUR University*, 2016, vol. 19, no. 4, pp. 74–77 (in Russ.).
 7. Samoylichenko M.A., Zhechev Y.S., Kosteletskii V.P., Gazizov T.R. Electrical characteristics of a modal filter with a passive conductor in the reference plane cutout. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2021, vol. 63, no. 2, pp. 435–442.
 8. Nosov A.V., Surovtsev R.S., Zabolotsky A.M., Gazizov T.P. [Experimental confirmation of the possibility of protecting radio-electronic equipment from an ultrashort pulse due to its decomposition in a C-section with a facial connection]. *Proceeding of TUSUR University*, 2016, no. 3, pp. 47–50 (in Russ.).
 9. Gazizov A.T., Zabolotsky A.M., Gazizov T.R. [Measurement and modeling of the time response of printed modal filters with a face connection]. *Radio Engineering and Electronics*, 2018, vol. 63, no. 3, pp. 292–298 (in Russ.).
 10. Chernikova E.B., Belousov A.O., Zabolotsky A.M. [Modeling and development of the layout of a mirror-symmetric modal filter]. *Electronic Devices and Control Systems. Materials of the International Scientific and Practical Conference*, 2017, no. 1-2, pp. 5–7 (in Russ.).
 11. Lv X., Yu W., Wu J., Luo X., Ge Y. Analysis and modeling of GaAs-based coupled microstrip lines. *Proceeding IEEE International Conference Microwave Technologies and Computational Electromagnetics*, 2011, pp. 136–139.
 12. Kim J.H., Oh D., Kim W. Accurate characterization of broadband multiconductor transmission lines for high-speed digital systems. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, Vol. 33, no. 4, pp. 857–867.
 13. Piekarz I., Sorocki J., Wincza K., Gruszczynski S. Microwave sensors for dielectric sample measurement based on coupled-line section. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2017, vol. 65, no. 5, pp. 1615–1631.
 14. Napoli L.S., Hughes J.J. Characteristics of coupled microstrip lines. *RCA Review*, 1970, vol. 31, pp. 479–498.
 15. Richings J.G., Easter B. Measured odd- and even-mode dispersion of coupled microstrip lines. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1975, vol. MTT-23, no. 10, pp. 826–828.
 16. Gould J.W., Tolboys E.C. Even and odd mode guide wavelengths of coupled lines in microstrip. *Electronics Letters*, 1972, vol. 8, no. 5, pp. 121–122.
 17. Wolff I., Kpi N. Microstrip ring resonator and dispersion measurement on microstrip lines. *Electronics Letters*, 1971, vol. 7, pp. 779–781.
 18. Hernández-Escobar A., Abdo-Sánchez E., Esteban J., Martín-Guerrero T.M., Camacho-Peñalosa C. Broadband Determination of the Even- and Odd-Mode Propagation Constants of Coupled Lines Based on Two-Port Measurements. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2020, vol. 68, iss. 2, pp. 648–654.
 19. Zysman G.I., Johnson A.K. Coupled Transmission Line Networks in an Inhomogeneous Dielectric Medium. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1969, vol. 17, no. 10, pp. 753–759.
 20. Vorob'ev P.A., Malyutin N.D. Analysis of the Characteristics of Coupled Strip Lines Using a nonuniform Dielectric with Concentrated Controlled Discontinuities. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenij. Radioelektronika*, 1975, vol. 18, iss. 2, pp. 97–99.
 21. Sychev A.N., Malyutin N.D., Trenkal E.I., Malyutin G.A. Special aspects in interference of in-phase and anti-phase waves with unequal phase velocities in coupled lines under pulse impact. *Journal of Physics*, 2020, pp. 22023.
 22. Ullah S., Ruan C., Haq T.U.I., Fahad A.K. A Miniaturized and High Efficient Quadband Rectenna Design for RF Energy Harvesting. *Proceedings of the 2018 IEEE 7th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation*, 2018, no. 8538151, pp. 202–203.
 23. Chen Q.P., Qamar Z., Zheng S.Y., Long Y. Design of a compact wideband butler matrix using vertically installed planar structure. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2018, no. 8408811, pp. 1420–1430.
 24. Sychev A.N., Struchkov S.M., Rudy N.Y., Salnikov A.S. Modeling of the vertically installed planar coupled lines by the numerical conformal transformation technique. *IEEE MTT-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization for RF, Microwave, and Terahertz Applications*, 2017, no. 7964202, pp. 106–108.
 25. Liu W.J., Zheng S.Y., Pan Y.M., Li Y.X., Long Y.L. A Wideband Tunable Reflection-Type Phase Shifter with Wide Relative Phase Shift. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2017, no. 7812672, pp. 1442–1446.
 26. Fusco V. Microwave circuits. Analysis and computer-aided design. *Radio and Communications*, 1990, 286 pp.
 27. Malyutin G.A. [Optimization of the algorithm for calculating strip structures by the grid method]. *Electronic Devices and Control Systems. Materials of the International Scientific and Practical Conference*, 2021, no. 1-1, pp. 100–103 (in Russ.).
 28. Radivoje M.B., Vladana D.L., Sarkar T.K., Djordjevic A.R. Wideband Frequency-Domain Characterization of FR-4 and Time-Domain Causality. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2001, vol. 43, no 4, pp. 662–667.
 29. Anpilogov V.R., Zimin I.V., Chekushkin Yu.N. [Dissipative losses in microstrip lines and microstrip antennas]. *Rocket and Space Instrumentation and Information Systems*, 2018, vol. 5, no. 3, pp. 60–69 (in Russ.).
 30. Sychev A.N., Struchkov S.M. [Systems of parameters of identical connected lines with unbalanced electromagnetic communication]. *Proceeding of TUSUR University*, 2014, no 1(31), pp. 39–50 (in Russ.).
 31. Trinh T.T. [To the definition of matrix parameters of connected lines with unbalanced electromagnetic coupling]. *Collection of Selected Articles of TUSUR Scientific Session*, 2021, no 1–1, pp. 175–179 (in Russ.).

Anton G. Loschilov

Candidate of Science in Engineering, Associate Professor,
Department of Design of Units and Components for
Radioelectronic Systems (KUDR), Tomsk University
of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0003-0669-5694
Phone: +7 (382-2) 51-43-02
Email: lag@main.tusur.ru

Thanh T. Trinh

Postgraduate student, KUDR, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-923-445-04-86
Email: thanhvodoi1995@gmail.com

Nickolay D. Malyutin

Doctor of Science in Engineering, Professor, KUDR), TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0003-0317-9096
Phone: +7-391-312-34-56
Email: ndm@main.tusur.ru

George A. Malyutin

Student KUDR, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-953-911-86-10
Email: mr.mageorge@yandex.ru